

# Sombras de agujeros negros

E. David Guzmán Ramírez

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

*4 de junio de 2019*

## I. INTRODUCCIÓN

### I.I. HISTORIA DE LA IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO

El 10 de abril del 2019 el Telescopio de Horizonte de Sucesos (o EHT por sus siglas en inglés), reveló la primera evidencia visual directa de un agujero negro supermasivo y su sombra. El EHT conecta telescopios de todo el mundo para formar un telescopio virtual del tamaño de la Tierra con una sensibilidad y resolución sin precedentes. El EHT es el resultado de años de colaboración internacional y ofrece a los científicos una nueva forma de estudiar los objetos más extremos del universo predichos por la relatividad general de Einstein.

La imagen revela el agujero negro en el centro de Messier 87, una galaxia masiva en el cercano cúmulo de galaxias Virgo. Este agujero negro reside a 55 millones de años luz de la Tierra y tiene una masa 6,500 millones de veces la del Sol [5].

Sin embargo, mucho antes de que este logro fuese realizado muchos investigadores usaron computadoras para reconstruir cómo se vería un agujero negro rodeado de material luminoso. Según las leyes de la relatividad general, los agujeros negros son invisibles por sí mismos. Al contrario de otros cuerpos celestes, su superficie no es sólida ni gaseosa, es un borde inmaterial, el horizonte de sucesos.

Visto en proyección sobre el cielo, el horizonte de sucesos tendría el aspecto de un disco negro perfectamente circular si el agujero negro es estático (solución de Schwarzschild) o ligeramente distorsionado si está en rotación (solución de Kerr).

Ahora, en condiciones astrofísicas típicas, un agujero negro realista, sea cual sea su tamaño, rara vez está desnudo, sino que está rodeado de material gaseoso. Al caer, el gas forma un disco de acreción caliente dentro del cual emite un espectro característico de radiación electromagnética. Por tanto, a pesar de que un agujero negro permanece invisible por sí mismo, atrae de manera característica a la materia cercana.

Tan pronto como se desarrollaron los principios básicos de la astrofísica de los agujeros negros en la década de 1970, los físicos se preguntaron cómo se vería un agujero negro rodeado de material luminoso. Actualmente, se pueden ver muchas representaciones educativas o artísticas, sin embargo, estas imágenes no informan describen la física detrás. Ésta puede describirse correctamente por medio de simulaciones numéricas, teniendo en cuenta las complejas distorsiones que el fuerte campo gravitacional imprime en el espacio-tiempo y las trayectorias de los rayos de luz. Los primeros cálculos comenzaron hace más de 40 años.

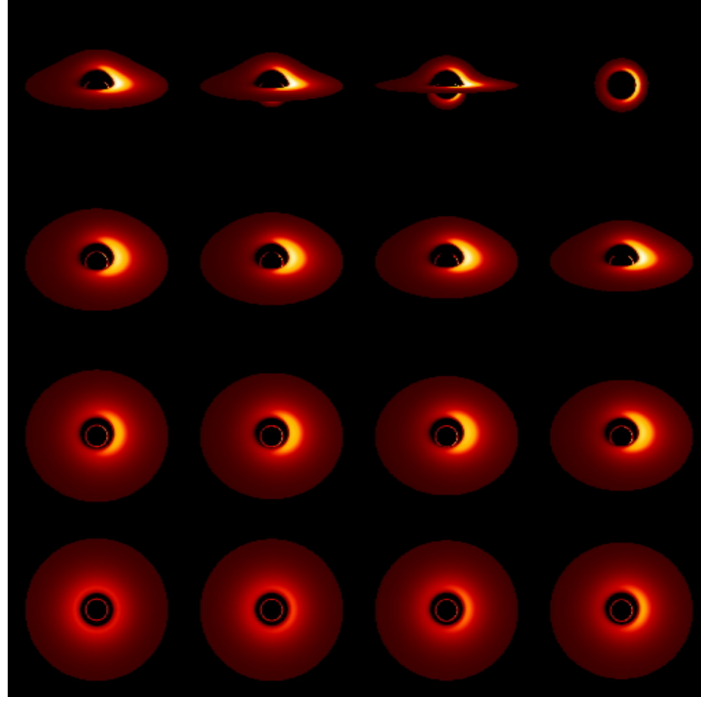


Figura 1: Imagen de un agujero negro para distintos ángulos. Imagen tomada de [4]

### I.I.I. IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO DE SCHWARZSCHILD DESNUDO

### I.I.II. IMAGEN DE UN AGUJERO NEGRO DE SCHWARZSCHILD CUBIERTO

Antes de comenzar a trabajar, es conveniente introducir las llamadas unidades naturales, definidas por

$$G = \hbar = c = 1. \quad (1)$$

## II. Solución de Schwarzschild

La solución de Schwarzschild se considera la solución más sencilla y útil de las ecuaciones de campo de Einstein. Esta solución corresponde a la descripción de un sistema con las siguientes propiedades: [3] [1] [2]

1. Tiene simetría esférica.
2. Es estática e invariante bajo inversión temporal
3. Está en el vacío.

La solución de Schwarzschild está dado por el intervalo

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \quad (2)$$

La solución de Schwarzschild es particularmente especial debido al llamado teorema de Birkhoff. G. D. Birkhoff demostró en 1923 que cualquier solución con simetría esférica a las ecuaciones de Einstein en el vacío ( $T_{\mu\nu} = 0$ ) debe ser estática y asintóticamente plana. La solución de Schwarzschild ha sido construida exigiendo que el espacio-tiempo sea esféricamente simétrico, estático y en el vacío; por lo que la solución no sólo es simple, sino también única.

## II.I. CANTIDADES CONSERVADAS EN SCHWARZSCHILD

## II.II. ÓRBITAS DE PARTÍCULAS LIBRES EN SCHWARZSCHILD

## II.III. COORDENADAS CELESTES

### III. Solución de Kerr

El espacio-tiempo alrededor de un agujero negro que rota con masa  $M$  y momento angular  $J$  puede ser descrito con el intervalo (con  $c = G = 1$ )

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2Mr}{\rho^2}\right) dt^2 - \frac{4Mar \sin^2 \theta}{\rho^2} d\varphi dt + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2Mra^2 \sin^2 \theta}{\rho^2}\right) \sin^2 \theta d\varphi^2, \quad (3)$$

donde

$$a \equiv \frac{J}{M}, \quad \rho^2 \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta \equiv r^2 - 2Mr + a^2. \quad (4)$$

La métrica definida en (3) es una solución exacta a las ecuaciones de campo de Einstein en el vacío, es decir,  $G_{\mu\nu} = 0$ . Las coordenadas  $(t, r, \theta, \varphi)$  usadas en (3) se llaman coordenadas de Boyer-Lindquist.

## III.I. CANTIDADES CONSERVADAS EN KERR

## III.II. ÓRBITAS DE PARTÍCULAS LIBRES EN KERR

### Referencias

- [1] E.F. Eiroa L. Amarilla. *Shadow of a rotating braneworld black hole*. *Physical Review D* 81, 064019, 2012. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.85.064019>.
- [2] E.F. Eiroa L. Amarilla. *Shadows of rotating black holes in alternative theories*. 2018. <https://arxiv.org/abs/1810.12767>.
- [3] J.P. Luminet. *Image of a Spherical Black Hole with Thin Accretion Disk*. *Astronomy and Astrophysics* 75, pages 228–235, 1979.
- [4] J.P. Luminet. [40 years of black hole imaging](#), May 2019.
- [5] Event Horizon Telescope. [Astronomers Capture First Image of a Black Hole](#), April 2019.